

Freie Zielfahrt

Pierre Barthels* und Jörg Wauer

Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, 76131, Karlsruhe, Germany

Von "freier Zielfahrt" spricht man in der Fördertechnik, wenn der Bewegungsablauf von Förder- und Hebezeugen (z.B. Gabelstapler) durch einen Menschen gesteuert wird und die Bewegung somit vorgegeben aber zufällig ist. Die hierbei auftretenden Transversalschwingungen der teleskopierbaren Segmente des Mastes reduzieren die Leistungsfähigkeit der Maschine und führen zu Sicherheitsproblemen. Dieser Beitrag befasst sich mit der Schwingungsunterdrückung bei solchen Systemen, wobei eine dem jeweiligen Systemzustand entsprechend geregelte Kraft auf das unterste Segment des Mastes aufgebracht wird.

© 2006 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

1 Modellierung

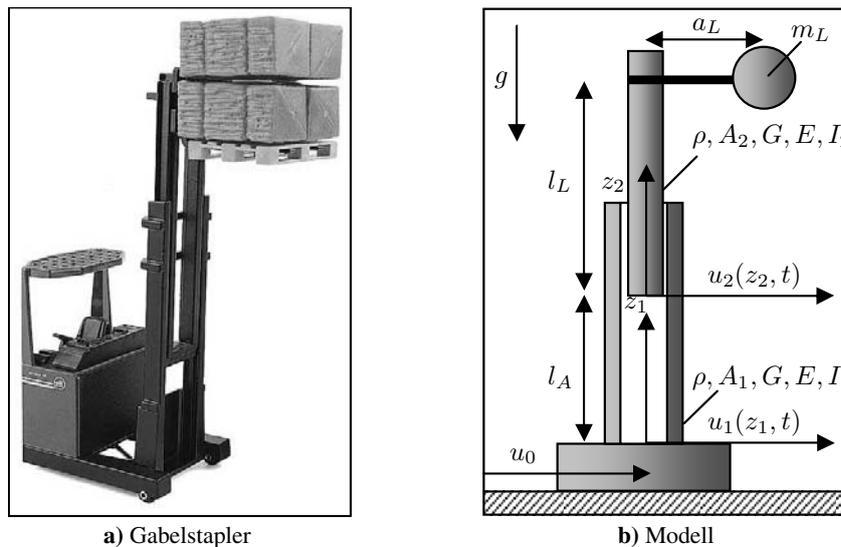


Abb. 1

a) Gabelstapler

b) Modell

Ausgangspunkt für eine erfolgreiche Schwingungsunterdrückung durch eine aktive Regelung ist ein geeignetes mathematisches Modell. Das in **Abb. 1b** dargestellte Modell besteht aus zwei flexiblen Körpern, welche über ein gewisses Spiel verschiebbar gegeneinander gelagert sind. Körper 1 ist an einem starren Trägerfahrzeug befestigt, am Körper 2 ist eine Last exzentrisch angebracht. Da die beiden flexiblen Körper in vielen Anwendungen schlank sind, können sie als Balken modelliert werden. Die Vorspannung der Balken durch ihr Eigengewicht und durch das Gewicht der zu transportierenden Last wird berücksichtigt. Da durch die exzentrisch angebrachte Last große Auslenkungen für die Ruhelage des Systems auftreten können, werden die Balken als geometrisch-nichtlineare Timoshenko-Balken modelliert. Basierend auf diesem physikalischen Modell und unter der Annahme dass die Teleskopierbewegung vorgegeben und als quasistatisch angenommen wird, führt das Prinzip von Hamilton auf ein gekoppeltes, nichtlineares, zeitvariantes System partieller Differentialgleichungen als mathematisches Modell:

$$\begin{aligned} \rho A_1 (u_{0tt} + u_{1tt}) + GA_1 (\alpha_{1z_1} - u_{1z_1z_1}) + \rho A_1 g [(l - z_1) u_{1z_1}]_{z_1} + [1 - \sigma(z_1 - l_A)] g (m_L + \rho A_2 l) u_{1z_1z_1} \\ + \delta(z_1 - l_A) g (m_L + \rho A_2 l) (\alpha_1 - u_{1z_1}) - f_{K_i} = \delta(z_1 - l_R) F_R, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho A_2 (u_{0tt} + u_{2tt}) + GA_2 (\alpha_{2z_2} - u_{2z_2z_2}) + \rho A_2 g [(l - z_2) u_{2z_2}]_{z_2} + [1 - \sigma(z_2 - l_L)] g m_L u_{2z_2z_2} \\ - \delta(z_2) g (m_L + \rho A_2 l) (\alpha_1(l_A) - u_{2z_2}) - \delta(z_2 - l_L) [g m_L u_{2z_2} - m_L (u_{0tt} + u_{2tt})] \\ - \delta(z_2 - l_L) [m_L \alpha_{2tt} a_L \alpha_2 + m_L \alpha_{2t}^2 a_L] + f_{K_i} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho I_1 \alpha_{1tt} + GA_1 (\alpha_1 - u_{1z_1}) - EI_1 \alpha_{1z_1z_1} - \delta(z_1 - l_A) g (m_L + \rho A_2 l) [u_2(0) - u_1(l_A)] = 0, \quad (3)$$

* Corresponding author: e-mail: barthels@itm.uka.de, Phone: +49 721 608 6146, Fax: +49 721 608 6070

$$\begin{aligned} \rho I_2 \alpha_{2tt} + GA_2 (\alpha_2 - u_{2z_2}) - EI_2 \alpha_{2z_2z_2} \\ + \delta(z_2 - l_L) \left[m_L a_L^2 \alpha_{2tt} - (u_{0tt} + u_{2tt}) a_L \alpha_2 - m_L g a_L \left(1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 \right) \right] = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Als Randbedingungen erhält man

$$\begin{aligned} u_1(0, t) = 0, u_{1z_1}(l, t) = \alpha_1(l, t), \alpha_1(0, t) = 0, \alpha_{1z_1}(l, t) = 0, \\ u_{2z_2}(0, t) = \alpha_2(0, t), u_{2z_2}(l, t) = \alpha_2(l, t), \alpha_{2z_2}(0, t) = 0, \alpha_{2z_2}(l, t) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Bei der "freien Zielfahrt" wird die Fußpunktbewegung u_0 vorgegeben. Die Kontaktkräfte f_{K_i} zwischen den beiden Körpern werden als einseitige Feder-Dämpfer-Elemente modelliert und über Dirac-Impulse als Flächenlast an diskreten Stellen aufgebracht. Auch die geregelte äußere Kraft F_R wird über einen Dirac-Impuls an der Stelle $z_1 = l_R$ eingeleitet.

Die Diskretisierung der Bewegungsgleichungen erfolgt durch das Galerkin-Verfahren. Durch die einfachen Randbedingungen aus Gl. (5) können hier als Ansatzfunktionen die Eigenformen des einseitig eingespannten (Körper 1) und des freien (Körper 2) Timoshenko-Balkens gewählt werden. Das Galerkin-Verfahren führt auf ein nichtlineares, zeitvariantes System gewöhnlicher Differentialgleichungen

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, l_A, l_L, F_R, u_{0tt}). \quad (6)$$

Für $l_A = \text{konst}$, $l_L = \text{konst}$, $F_R = 0$ und $u_{0tt} = 0$ kann die Ruhelage \mathbf{q}_0 des Systems berechnet werden. Eine Linearisierung um \mathbf{q}_0 und die Koordinatentransformation $\mathbf{q}_l = \mathbf{q} - \mathbf{q}_0$ führen auf ein lineares, zeitinvariantes System gewöhnlicher Differentialgleichungen

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}_l = \mathbf{b}_R^* F_R + \mathbf{b}_{u_0}^* u_{0tt}. \quad (7)$$

Eine modale Reduktion des Modells, die Modellierung des zur Regelung verwendeten Aktors als Verzögerungsglied 1. Ordnung

$$T_R \dot{F}_R + F_R = K_R U \quad (8)$$

und eine Transformation auf Zustandskoordinaten führt auf das folgende Modell der zu regelnden Strecke:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{b}U + \mathbf{b}_S u_{0tt}. \quad (9)$$

2 Regelung

Basierend auf dem Zustandsmodell aus Gl. (9) wird eine **Zustandsregelung mit Polvorgabe** entwickelt um die tieffrequenten Schwingungen des Systems zu unterdrücken. Die Polzuweisung für den Regler erfolgt nach **J. Ackermann**. Die Zustandsgrößen die dem Regler hierbei zugeführt werden sind nicht direkt messbar und werden durch einen **Luenberger Beobachter** ermittelt. Auch hier erfolgt die Polzuweisung nach **J. Ackermann**.

Um die Robustheit des Reglers zu überprüfen und um den Einfluss des Spiels in den Kontaktbereichen auf den Regelkreis zu untersuchen, wird der für das reduzierte, lineare Modell (Gl. (9)) entwickelte Regler auf das nichtlineare Modell aus Gl. (6) angewandt. Da in diesem Modell auch Schwingungen mit höheren Frequenzen berücksichtigt werden, können so auch Untersuchungen zu möglichen "Spillover Effekten" durchgeführt werden.

3 Ausblick

Da die zu transportierende Last sich im Betrieb von Fahrt zu Fahrt verändert und Teleskopiervorgänge auch während des Betriebes möglich sein sollen, müssen die Parameter des Reglers und des Beobachters für unterschiedliche Systemzustände bestimmt werden. Eine Interpolation dieser Parameter führt zu einem gesteuert adaptiven Regler und einem gesteuert adaptiven Beobachter.

Literatur

- [1] P. Barthels, J. Wauer, Modeling and Dynamic Analysis of Telescopic Systems of Structural Members with Clearance, *Nonlinear Dynamics*, Volume 42, Number 4, 371–382 (2005).
- [2] P. Barthels, J. Wauer, M. Mittwollen, D. Arnold, Vibration Suppression for Telescopic Systems of Structural Members with Clearance, *Proc. 9th Int. Conf. on Energy and Environment 2005*, Cairo/Shram El-Sheikh (Egypt), A.I. El-Sharkawy and R.H. Kummler (Eds.), CD-ROM, Session "Vibration & Control-3" (2005).
- [3] P. Barthels, J. Wauer, Modellierung mehrfach gestufter, teleskopierbarer, spielbehafteter Maschinenelemente, *PAMM*, Vol. 4, Issue 1, 81–82, (2004).